

Various Numerical and Analytical Methods for Studying the Electromagnetic Fields Effects on the Human Body: A Classical Review Article

Mohammad Bagher Heydari^{1*}, Masoud Asgari², Niloofar Jafari³, Seyed Mehdi Mohtavipour¹,
Mohsen Zolfaghari⁴

¹ Electrical Engineering Department, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

² Electrical Engineering Group, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran

³ School of advanced medical sciences, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

⁴ Electrical Engineering Department, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran

Abstract

Introduction: Due to the increment of electromagnetic-based devices, many research articles have been studied the electromagnetic fields (EMFs) effects on the human body in recent years. In most of the studies, there is not an accurate analytical method for solving Maxwell's equations. Thus, various numerical techniques have been utilized to solve Maxwell's equations. In this review article, we first introduce Maxwell's equations briefly. Then, various numerical and analytical methods used in the literature as well as research softwares were introduced based on the numerical methods.

Methods and Materials: The present article consider various numerical and analytical methods for studying EMF effects on the human body based on a credible databases research.

Results: The EMFs effects on the human body were classified in terms of tissue distance from the EM source into two main categories: Far field and near field. In near field region, four categories have been studied in the current article.

Discussion and Conclusion: At first, Maxwell's equations are introduced briefly and various numerical and analytical methods for solving these equations have been investigated. Then, human body models used in EMF numerical simulations have been considered, which Debye and Cole-Cole formulations are the most popular models in the literatures. In these models, the electric properties of the tissue were expressed in terms of tissue conductivity and permittivity. Finally, the EMFs effects on the human body will be studied based on the tissue distance from the EM source.

Keywords: Electromagnetic fields, Human body, Numerical technique, Analytical method, Specific absorption rate

*(Corresponding Author: Mohammad BagherHeydari): Iran University of Science and Technology, Hengam Ave, Resalat, Tehran, Iran
E mail: mo_heydari@elec.iust.ac.ir

روش‌های عددی و تحلیلی مختلف برای مطالعه تأثیرات امواج الکترومغناطیسی بر بدن انسان: یک مقاله مروری کلاسیک

محمدباقر حیدری^{۱*}، مسعود عسگری^۲، نیلوفر جعفری^۳، سید مهدی محتوی پور^۱، محسن ذوالفقاری^۵

^۱ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲ گروه مهندسی برق، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

^۳ دانشکده علوم نوین پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تبریز، تبریز، ایران

^۴ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

مقدمه: در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش دستگاه‌های مبتنی بر امواج الکترومغناطیس، مقالات زیادی به بررسی تأثیرات و مضرات این امواج بر قسمت‌های مختلف بدن انسان پرداخته‌اند. برای مطالعه این تأثیرات، بدلیل نبود یک روش تحلیلی دقیق برای حل معادلات ماکسول در اکثر موارد، روش‌های عددی متنوعی برای حل این معادلات پیشنهاد شده است. در این مقاله مروری، ابتدا به طور خلاصه، معادلات ماکسول معرفی شده و سپس انواع روش‌های عددی و تحلیلی استفاده شده در مقالات و نیز نرم افزارهای تحقیقاتی بر پایه همین روش‌های عددی معرفی می‌شوند.

مواد و روش‌ها: در این مقاله، پس از جست و جو در بانک‌های اطلاعاتی معتبر، سعی شده است که به طور منظم و کلاسیک، به مرور انواع روش‌های عددی و تحلیلی در مطالعه تأثیرات امواج الکترومغناطیسی بر قسمت‌های مختلف بدن پرداخته شود. **یافته‌ها:** در این مقاله، بر اساس فاصله بافت مورد نظر با منبع الکترومغناطیس، اثرات امواج بر بدن انسان، به دو دسته میدان نزدیک و میدان دور، تقسیم می‌شوند. در میدان نزدیک، اثرات امواج بر بدن به ۴ دسته کلی تقسیم شده و هر یک از این دسته‌بندی‌ها، به تفصیل مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

بحث و نتیجه‌گیری: در این مقاله مروری، ابتدا معادلات ماکسول، انواع روش‌های عددی و تحلیلی استفاده شده در مقالات و نیز نرم افزارهای شبیه‌سازی بررسی می‌شوند. سپس مدل‌های بدن انسان در حضور امواج الکترومغناطیسی معرفی می‌شوند که مهم‌ترین آن‌ها، روابط دِباي و کُل-کُل هستند. در این مدل‌ها، ویژگی الکتریکی بافت‌ها بر اساس ضرایب نفوذپذیری الکتریکی و هدایت پذیری بافت‌ها بیان می‌شود. در آخر، بر اساس میزان دوری یا نزدیک منبع به بافت مورد نظر، اثرات امواج بر بدن به صورت دقیق مطالعه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: میدان‌های الکترومغناطیسی، بدن انسان، تکنیک عددی، روش تحلیلی، نرخ مخصوص جذب

مقدمه

تأثیرات، ابتدا باید به سراغ معادلات ماکسول رفت (۱-۲). در اکثر موارد، یک روش تحلیلی دقیق برای حل معادلات ماکسول برای ساختارها و مسائل مختلف وجود ندارد و لذا این معادلات باید به صورت عددی حل شوند. امروزه روش‌های حل عددی متنوع و

در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش دستگاه‌های مبتنی بر امواج الکترومغناطیس، مقالات زیادی به بررسی تأثیرات و مضرات این امواج بر قسمت‌های مختلف بدن انسان پرداخته‌اند. برای مطالعه این

بر بدن انسان با این روش‌ها به صورت تاریخی و موضوعی مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرد.

نتایج

معرفی مختصر معادلات ماکسول

استفاده از امواج الکترومغناطیس در فرکانس رادیویی و مایکروویو نه تنها در کاربردهای مخابراتی پیشرفته نظیر موبایل، بلکه در کاربردهای پزشکی و درمانی نظیر ام آر آی، کاربرد دارد. از آنجایی که محاسبه و اندازه‌گیری دقیق میدان‌ها و جریان‌های الکتریکی بر بدن انسان، دشوار است، روش‌های عددی که تعامل میدان‌های الکترومغناطیسی را با بدن توصیف می‌کنند، می‌توانند برای این منظور استفاده شوند. تئوری الکترومغناطیس کلاسیک بر مبنای معادلات ماکسول شکل گرفته است که فرم دیفرانسیلی و انتگرالی آنها به صورت زیر است (۱):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \leftrightarrow \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1)$$

(۲)

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \leftrightarrow \oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(\int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} + \varepsilon_0 \int_s \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \right)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \leftrightarrow \oint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_v \rho \, dv \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \leftrightarrow \oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (4)$$

که در آنها، \mathbf{E} میدان الکتریکی (v/m)، \mathbf{B} شدت میدان مغناطیسی (T)، \mathbf{J} چگالی جریان هدایتی (A/m^2)، ρ_0 چگالی بار (C/m^2)، μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد و ε_0 ضریب نفوذپذیری الکتریکی فضای آزاد است.

رنج تغییرات فرکانس امواجی که در معرض بدن انسان قرار گرفته و کاربردهای پزشکی دارند، در بازه ۱۰ مگاهرتز تا ۱۰ گیگاهرتز متغیر است. حد بالای این رنج فرکانسی (۱۰ گیگاهرتز) برای نفوذ امواج در بافت‌ها، بسیار کم (در حد ۳،۵ میلی متر) است. در کاربردهای پزشکی مرسوم است که نرخ مخصوص جذب (SAR) به صورت زیر تعریف شود (۲):

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dv} \right) \quad (5)$$

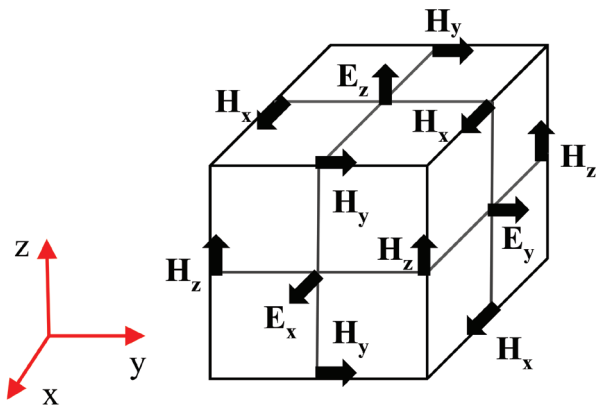
بر کاربرد برای این معادلات پیشنهاد شده است که در این مقاله، مهم‌ترین آن‌ها جهت مطالعه تأثیرات امواج بر بدن، معرفی می‌شوند (۳-۱۴). انواع روش‌های استفاده شده در مقالات، به دو دسته مدل تفاضلی و مدل انتگرالی، تقسیم می‌شوند. مدل تفاضلی از معادلات دیفرانسیلی معادلات ماکسول بدست آمده و مدل انتگرالی بر مبنای فرم انتگرالی این معادلات می‌باشد.

برای استفاده از روش‌های عددی، باید محیط مورد نظر (در این جا، بدن انسان) به صورت الکترومغناطیسی مدل سازی شود (۱۵-۲۸). در این میان، استفاده از مدل دِباي و کول-کول، که ویژگی الکتریکی بافت‌ها بر اساس ضرایب نفوذپذیری الکتریکی و هدایت پذیری بافت‌ها بیان می‌شود، بسیار پرکاربرد است (۲۸). از مدل «دِباي» برای شبیه سازی مغز انسان در فرکانس‌های مایکروویو استفاده شده است (۲۹-۳۰).

در این مقاله مروری، ابتدا به طور خلاصه، معادلات ماکسول معرفی شده و سپس انواع روش‌های عددی و تحلیلی استفاده شده در مقالات برای مطالعه تأثیرات امواج بر بدن انسان، مرور می‌شوند. امروزه محققین به جای نوشتن کد عددی، از نرم افزارهای تجاری-تحقیقاتی بر پایه همین روش‌های عددی استفاده می‌کنند. لذا، به طور خلاصه انواع نرم افزارهای شبیه سازی تحقیقاتی پرکاربرد معرفی می‌شود. در قسمت بعدی مقاله، بر اساس فاصله بافت مورد نظر با منبع الکترومغناطیس، اثرات امواج بر بدن انسان، در دو دسته میدان نزدیک و میدان دور، طبقه بندی می‌شوند. در میدان نزدیک اثرات امواج بر بدن به ۴ دسته کلی تقسیم می‌شوند: ۱- تشعشعات موبایل، ۲- تصویر برداری تشدید مغناطیسی (ام آر آی)، ۳- گرما درمانی و ۴- رادیو متری مایکروویو. هر یک از این دسته بندی‌ها، مورد مطالعه دقیق قرار می‌گیرد. در آخر، مقاله نتیجه‌گیری شده و اتمام می‌یابد.

مواد و روش‌ها

در این مقاله، پس از جست و جو در بانک‌های اطلاعاتی معتبر، سعی شده است که به طور منظم و کلاسیک، به مرور انواع روش‌های عددی در مطالعه تأثیرات امواج الکترومغناطیسی بر قسمت‌های مختلف بدن پرداخته شود. به همین منظور، ابتدا روش‌های عددی مختلف به طور خلاصه معرفی شده و سپس تأثیرات امواج الکترومغناطیسی



شکل ۲- سلول واحد «یی» در روش تفاضل محدود- حوزه زمان (۵)

روش «تفاضل محدود-حوزه زمان» برای شبیه سازی مدل چشم انسان در معرض تابش موج صفحه‌ای در فرکانس ۷۵۰ مگاهرتز و ۱٫۵ گیگاهرتز به کار رفت (۴). شکل (۲)، اجزای میدان الکتریکی و مغناطیسی استفاده شده برای سلول واحد «یی» را در این روش نشان می‌دهد. جزئیات روابط ریاضی این روش در کتاب (۵)، به تفصیل بیان شده است.

۲- روش عددی انتگرال محدود (FIT)

روش انتگرال محدود که توسط «وای لند» (Weiland) در سال ۱۹۷۷ معرفی شد (۶)، بر مبنای گسسته سازی فرم‌های انتگرالی

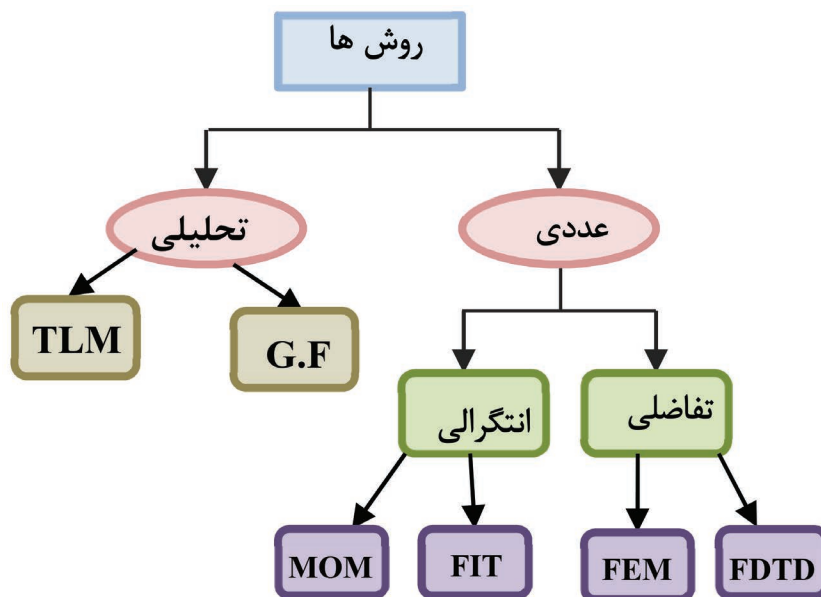
که در واقع، مشتق زمانی تغییرات انرژی جذب شده یا تلف شده به تغییرات جرم است. تعریف فوق در بسیاری از کاربردهای پزشکی حائز اهمیت است.

انواع روش‌های عددی و تحلیلی استفاده شده برای بررسی تاثیرات امواج الکترومغناطیسی بر بدن انسان

در این قسمت، به طور خلاصه، انواع روش‌های عددی و تحلیلی برای حل معادلات ماکسول بررسی خواهد شد. شکل (۱)، انواع روش‌های استفاده شده در مقالات را برای مطالعه تاثیرات امواج بر بدن نشان می‌دهد که روش‌های عددی، به دو دسته مدل تفاضلی و مدل انتگرالی، تقسیم می‌شوند. مدل تفاضلی از معادلات دیفرانسیلی معادلات ماکسول بدست آمده و مدل انتگرالی بر مبنای فرم انتگرالی این معادلات می‌باشد. به طور مختصر به بررسی این روش‌ها در زیر پرداخته می‌شود.

۱- روش عددی تفاضل محدود-حوزه زمان (FDTD)

این روش، یک روش تفاضلی بر مبنای گسسته سازی فرم دیفرانسیلی معادلات (۱) و (۲) ماکسول در حجم و بازه زمانی مورد نظر می‌باشد. این روش ابتدا توسط محقق به نام «یی» (Yee)، در سال ۱۹۶۶ معرفی و به کار گرفته شد (۳) و سپس توسط «تفلاو» (Taflove)، به عنوان



شکل ۱- انواع روش‌های مورد استفاده در مقالات برای مطالعه تاثیرات امواج الکترومغناطیسی بر بدن انسان

معادلات ماکسول و تبدیل آن‌ها به مجموعه دستگاه‌های ماتریسی، می‌باشد. این روش عددی، قادر به مدل سازی انواع محیط‌های الکترومغناطیسی مختلف نظیر محیط ناهمسانگرد، محیط پاشنده و محیط غیرخطی می‌باشد. جزئیات این روش در مرجع (۵) آمده است.

۳- روش مومنت (MoM)

این روش عددی، که اولین بار توسط «هرینگتون» (Harrington) در سال ۱۹۶۷ معرفی شد (۷)، یک روش عددی در حوزه فرکانس بوده و می‌تواند توسط عملگرهای انتگرالی یا تفاضلی استفاده شود، هر چند که بیشتر مدل انتگرالی آن استفاده می‌شود (شکل ۱) را ببینید). در این روش، با استفاده از توابع گرین، مسئله به صورت عبارت‌های انتگرالی بیان شده و سپس برای حل، به دستگاه معادلات خطی تبدیل می‌شود. این روش عددی، برای مسائلی که با منبع یا اسکترهای هادی کامل سر و کار دارد، بسیار مناسب است. یکی از مزایای این روش، این است که برخلاف روش‌های تفاضل محدود- حوزه زمان و انتگرال محدود، فقط قسمت محدود به ساختار مورد بحث، مش بندی شده و فضای آزاد، مش بندی نمی‌شود. ترکیب این روش با روش‌های عددی دیگر نظیر تفاضل محدود- حوزه زمان یا المان محدود، برای حل مسائل الکترومغناطیس، بسیار جذاب و رهگشا می‌باشد.

۴- روش المان محدود (FEM)

این روش، بر اساس فرم دیفرانسیلی معادلات ماکسول بوده که در آن، تابع هدف، به صورت ترکیبی از توابع پایه تعریف شده در حوزه عناصر مش، نوشته می‌شود که شامل همه ناحیه عددی موردنظر می‌شود. در نتیجه، معادلات میدان به صورت عبارت‌هایی از چند جمله‌ای‌ها با ضرایب نامعین، در نقاط گره مش‌ها، بیان می‌شوند. در این روش عددی، ابتدا کل دامنه مسئله گسسته سازی شده، سپس با انتخاب توابع پایه مناسب، سیستم معادلات نرمالیزه می‌شود. در آخر با حل معادلات گسسته، ضرایب نامعین به دست می‌آید. یکی از عیب‌های روش المان محدود، این است که برای گسسته سازی کامل فضای سه بعدی، به حافظه بالای کامپیوتری نیاز بوده و لذا برای مسائل بزرگ، این روش مناسب نیست.

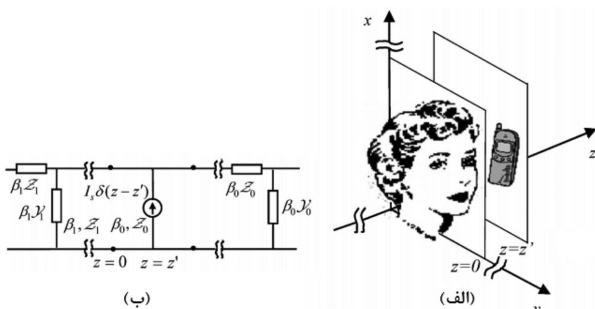
۵- روش‌های عددی ترکیبی

روش‌های عددی ترکیبی، برای شبیه سازی مسائلی با حجم بزرگ، به کار می‌روند. برای نمونه، در مقاله‌های (۸ و ۹)، با استفاده از ترکیب روش‌های عددی مومنت و تفاضل محدود- حوزه زمان، نرخ مخصوص جذب بدن که در معرض آنتنی با فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز در فواصل ۰,۵ تا ۲ برابر طول موج، از سر فرد قرار گرفته، استفاده شده است. در مقاله (۱۰)، با استفاده از روش ترکیبی المان محدود-انتگرال مرزی (FEM-BI)، میدان پراکنده شده از مغز انسان که در معرض یک موبایل قرار گرفته، به صورت عددی شبیه سازی می‌شود.

۶- روش‌های تحلیلی تابع گرین (Green's Function) و مدل

خط انتقال (TLM)

برای محاسبه میزان نفوذ میدان‌های الکترومغناطیسی در بدن انسان نظیر سر، می‌توان از روش‌های تحلیلی استفاده نمود. نمونه‌ای از روش‌های تحلیلی، روش تابع گرین است. در این روش، میدان‌های الکترومغناطیسی یک منبع تحریک کننده (مانند گوشی همراه) به عنوان تابع گرین اولیه در نظر گرفته شده و میدان‌های ثانویه ایجاد شده ناشی از این منبع در بدن، به عنوان تابع گرین ثانویه، باید محاسبه شوند (۱۱-۱۳). روش تحلیلی دیگر، مدل خط انتقال است. در این روش، میدان‌های الکترومغناطیسی به صورت خط انتقال در تئوری الکترومغناطیس، مدل می‌شوند (۱). برای مثال، در مقاله (۱۴)، تشعشعات یک موبایل که در مجاورت سر انسان، قرار گرفته، با استفاده از این روش تحلیل شده و یک مدل خط انتقالی برای آن، پیشنهاد می‌شود که در شکل (۳)، آمده است.



شکل ۳- الف) سر انسان در مجاورت دستگاه گوشی همراه، ب) مدل خط انتقالی پیشنهاد شده (۱۴)

معرفی انواع نرم افزارهای شبیه سازی تحقیقاتی مورد

استفاده برای مطالعه تأثیرات امواج بر بدن

در قسمت قبل، به اختصار انواع روش‌های عددی که در مقالات چاپ شده در مراجع معتبر، جهت مطالعه تأثیرات امواج بر بدن انسان استفاده شده است، بررسی شد. در عمل، محققان برای مطالعه امواج الکترومغناطیسی بر بدن، از نرم افزارهای تحقیقاتی که بر پایه همان روش‌های عددی معرفی شده می‌باشند، استفاده می‌کنند. در جدول (۱)، تعدادی از نرم افزارهای تحقیقاتی مهم و روش عددی مبتنی در هر یک از آنها، آورده شده است که در زیر به طور خلاصه معرفی می‌شوند:

۱- نرم افزار FEKO

این نرم افزار، بر اساس روش‌های عددی مومنت و المان محدود، به شبیه سازی تأثیرات میدان‌های الکترومغناطیسی بر بافت‌های مختلف بدن می‌پردازد. در این نرم افزار، روش عددی مومنت، با مش بندی کمتر از $\lambda/10$ (λ طول موج)، دقت محاسبات را بالا برده ولی در عین حال، به حافظه کامپیوتری زیادی جهت اجرای شبیه سازی نیاز دارد. مزیت مهم این روش عددی، این است که فقط خود ساختار جسم، مش بندی شده و فضای اطراف جسم، مش بندی نمی‌شود و لذا برای بافت‌های کوچک بدن، بسیار مناسب است. روش عددی دیگر این نرم افزار، روش المان محدود است که علاوه بر مش بندی ساختار، فضای اطراف نیز باید مش بندی شود. لازم به ذکر است که کاربر به انتخاب خود می‌تواند یکی از روش‌های مذکور در این شبیه ساز را جهت مطالعه و شبیه سازی، انتخاب نماید.

۲- نرم افزار CST

این شبیه ساز که توسط شرکت CST GmbH ساخته شده، از روش انتگرال محدود، برای شبیه سازی ساختارهای مختلف، بهره می‌برد. این روش در این شبیه ساز، علاوه بر سرعت بالا در تولید مش و سرعت محاسبه بالا، کلیه مزیت‌های روش تفاضل محدود-حوزه زمان را نیز داراست. این نرم افزار، به طور پیش فرض، از مش بندی چهارگوشه برای شبیه سازی استفاده کرده و برای مطالعه تأثیرات امواج بر روی بافت‌های بزرگ بدن، بسیار مناسب است.

۳- نرم افزار HFSS

این نرم افزار، بر پایه روش عددی المان محدود بنا شده است. در این روش، برای حل معادلات ماکسول نیازمند مش بندی تمام محیط حل مسئله، حتی فضای آزاد تعریف شده در اطراف جسم، می‌باشد. نرم افزار HFSS به علت تعداد زیاد مش‌ها، نیازمند یک سیستم کامپیوتری قوی خواهد بود. در نتیجه این نرم افزار برای شبیه سازی بافت‌های بدن با ابعاد متوسط و بزرگ به هیچ عنوان مناسب نمی‌باشد.

۴- نرم افزارهای XFDTD و FIDELITY

این دو نرم افزار بر پایه روش عددی تفاضل محدود-حوزه زمان نوشته شده‌اند. این روش عددی قادر به شبیه سازی امواج الکترومغناطیسی برای بافت‌های بدن در حوزه زمان بوده و از این جهت، یک روش کارآمد در این حوزه می‌باشد.

مدل‌های بدن انسان در حضور امواج الکترومغناطیسی

در سال ۱۹۸۷، «سالی ون» (Sullivan)، نرخ جذب مخصوص را با استفاده از یک مدل تاب گشت (Torso) شامل $16,628$ سلول که به ۱۴ نوع بافت، تقسیم شده بود، پیش بینی کرد و سپس با استفاده از داده حاصله از سی تی اسکن بر روی یک بیمار سرطانی، مدلی شامل $35,000$ سلول $10 \times 10 \times 10$ میلی متر مکعب را پیشنهاد داد؛ به طوری که این مدل در شبیه سازی تفاضل محدود-زمان محدود، استفاده شد (۱۵). با افزایش امکانات کامپیوتری، رزولوشن مدل‌های کاربردی، افزایش یافت. برای نمونه، «گاندی» (Gandhi) در سال ۱۹۶۶، یک بدن کامل با رزولوشن $1,9 \times 1,9 \times 3$ میلی متر مکعب بر

جدول ۱- انواع نرم افزارهای شبیه سازی تحقیقاتی

نرم افزار	روش عددی	شرکت سازنده
HFSS	FEM	Ansoft
CST	FIT	CST GmbH
FEKO	MoM/FEM	Electromagnetic Software and Systems
XFDTD	FDTD	Remcom
FIDELITY	FDTD	Zeland Software

که زمان محاسبه را بالا می‌برد، به صورت زیر خلاصه شد (۲۸):

$$\bar{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_{s_1} - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau_1} + \frac{\epsilon_{s_2} - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau_2} \quad (7)$$

از مدل «دبای» برای شبیه‌سازی مغز انسان در فرکانس‌های مایکروویو استفاده شده است (۲۹-۳۰). مقاله (۳۰)، نمونه‌ای از تحقیقاتی است که در آن، با استفاده از روش تفاضل محدود-حوزه زمان، تاثیر امواج موبایل بر مغز انسان شبیه‌سازی و مطالعه می‌شود.

دسته‌بندی کلی اثرات امواج الکترومغناطیسی بر بدن بر اساس میدان نزدیک و میدان دور

هنگامی که بدن انسان در معرض یک منبع الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد، با توجه به فاصله بافت تا منبع مایکروویو (یا آنتن)، می‌تواند تاثیرات متفاوتی داشته باشد. برای حالتی که فاصله منبع و بافت مورد نظر بدن از $2D^2/\lambda$ (D بزرگترین بُعد منبع و λ طول موج است) بیشتر باشد، اصطلاحاً گفته می‌شود که بافت بدن در معرض «میدان دور» قرار گرفته است. در عوض، هنگامی که بافت در فاصله خیلی نزدیک به منبع قرار می‌گیرد، اصطلاح «میدان نزدیک» استفاده می‌شود که این میدان می‌تواند رآکتیو (خیلی نزدیک به منبع) یا تشعشعی (فاصله‌های نزدیک به $2D^2/\lambda$) باشد.

در حالت میدان دور، میدان‌های الکترومغناطیسی به موج صفحه‌ای تبدیل شده و مستقل از منبع می‌شوند. در این حالت، اندازه دامنه میدان تشعشع‌کننده با افزایش فاصله از آنتن، کاهش می‌یابد. در میدان دور، میدان‌های ثانویه‌ای که در داخل بافت در معرض میدان‌ها، ایجاد می‌شود، به عوامل مختلفی مانند اندازه، شکل و استقرار بدن، توزیع دی‌الکتریک بافت‌ها، فرکانس و پلاریزاسیون موج اولیه آنتن بستگی دارد. این در حالی است که در میدان‌های نزدیک، توان بین منبع و محیط اطراف در هر دوره تناوب، برای میدان متغیر با زمان مبادله می‌شود (ناحیه رآکتیو). در این حالت، میدان‌های اولیه به مشخصات منبع و فاصله آن از بدن، بستگی دارند. شکل (۴)، دسته‌بندی کلی اثرات میدان‌های الکترومغناطیسی بر بدن انسان را بر اساس نوع میدان نزدیک و میدان دور منبع نشان می‌دهد.

۱- میدان دور

در این بخش، کارهای صورت گرفته برای بافت‌های انسان در

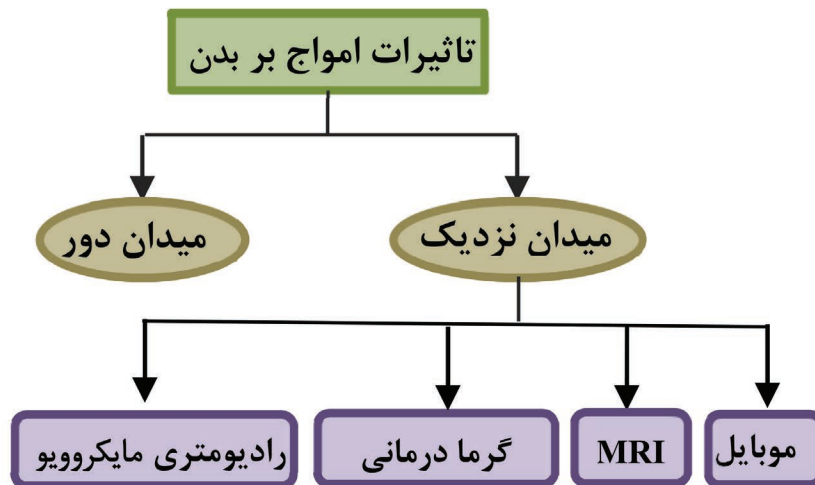
مبنای اسکن ام آر آی یک مرد با ارتفاع ۱٫۸۸ متر و وزن ۶۴ کیلو، معرفی کرد (۱۶). در سال ۲۰۰۲، مدل نورمان توانست که مدلی برای ۳۸ نوع بافت بدن، ارائه دهد (۱۷). در سال‌های ۲۰۰۲-۲۰۰۵، مدل‌های دیگری برای ساختار بدن پیشنهاد شد (۱۸-۲۱). برای نمونه، در سال ۲۰۰۵، «لیو» (Liu) یک مدل را برای زن با قد ۱٫۵۵ متر و جرم ۸۵٫۵ کیلو، که بافت‌های بدن او به ۳۶ قسمت با $5 \times 5 \times 5$ میلی‌متر مکعب سلول، تقسیم شده بود، معرفی و بررسی کرد (۲۱). در بسیاری از مدل‌های دوزیمتری، از مقادیر نفوذ پذیری و هدایت پذیری بافت‌های مختلف بدن بر مبنای کار افرادی نظیر «گابریل» (Gabriel) و «اسمیت» (Smith) استفاده می‌شود (۲۲-۲۵). برای نمونه در سال ۲۰۰۷، «لژیب نیک» (Lazebnik) نتایج مطالعه ویژگی‌های دی‌الکتریک را برای بافت‌های سینه که با استفاده از جراحی بدست آمده بود، منتشر کرد (۲۶). این نمونه‌ها در رنج ۰٫۵-۲۰ گیگاهرتز مطالعه شده بودند (۲۶). نویسندگان این مقاله، نشان دادند که خواص دی‌الکتریک بافت‌های سینه، توسط محتوای چربی هر بافت تعیین می‌شود (۲۶). به طوری که این گروه، در سال ۲۰۰۷، موفق به توصیف خواص دی‌الکتریک مدل «دبای» (Debye) برای بافت‌های سینه تا فرکانس ۲۰ گیگاهرتز شدند (۲۷).

امروزه استفاده از پالس‌های الکترومغناطیس بسیار پهن باند در بیوتکنولوژی و داروسازی گسترش یافته است. همانطور که گفته شد، ویژگی‌های الکتریکی بافت‌ها، به دلیل پاشندگی آنها، به فرکانس کاری بستگی دارد. در سال ۱۹۶۶، «گابریل» مدل‌هایی را برای بافت‌های بدن معرفی کرد که شامل روابط دبای و کل-کل (Cole-Cole) بود (۲۴). با توجه به پاشندگی بافت‌ها، رابطه کل-کل در حالت کلی می‌تواند به صورت زیر بیان شود (۲۴):

$$\bar{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \sum_n \frac{\epsilon_{s_n} - \epsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau_n)^{1-\alpha_n}} + \frac{\sigma_i}{j\omega\epsilon_0} \quad (6)$$

که در آن، $\bar{\epsilon}$ ضریب نفوذ پذیری نسبی مختلط که تابع فرکانس (ω) بوده، ϵ_0 ضریب نفوذ پذیری خلاء، ϵ_{∞} ضریب نفوذ پذیری بافت برای $\omega\tau \gg 1$ ، ϵ_s ضریب نفوذ پذیری برای بازه $\omega\tau \ll 1$ ، σ_i هدایت پذیری استاتیکی و ضرایب α_n ، ضرایب وابسته به پاشندگی هستند.

مدل «دبای» در سال ۲۰۰۵ توسط «سیممی چوک» (Simicevic) برای شبیه‌سازی بسیار پهن باند در روش تفاضل محدود-حوزه زمان،



شکل ۴- دسته بندی کلی تأثیرات امواج الکترومغناطیسی بر بدن انسان بر اساس فاصله منبع تا بافت مورد نظر

گرفته بود، در فرکانس ۰٫۱ تا ۴ گیگاهرتز مطالعه‌ای انجام داد (۳۳). او در این مطالعه، نتیجه گرفت که برای فرکانس‌های بیشتر از تشدید، میانگین ضریب جذب ویژه کل بدن به ضخامت چربی پوست (که به عنوان یک لایه تطبیقی عمل می‌کند) بستگی دارد (۳۳).

تحقیقات دیگری در زمینه تأثیر امواج تخت بر روی بدن توسط «دیمیبلو» صورت گرفته است (۳۴-۳۶). در سال ۲۰۰۷، «ناگا اُکا» (Nagaoka)، با استفاده از روش تفاضل محدود-حوزه زمان، تأثیر امواج صفحه‌ای را بر روی یک زن ژاپنی باردار (با ۲۶ هفته حاملگی) مورد مطالعه قرار داد و نتیجه گرفت که متوسط ضریب جذب ویژه کل بدن، حدود ۱٫۰۹ دسیبل با بدن زن غیرحامله فرق دارد (۳۷). در این سال، «هیراتا» (Hirata) با بررسی مدل کودکان ۵ و ۱۰ ساله، نتیجه گرفت که خواص دی الکتریک بافت‌ها، اثر بسیار غالبی بر متوسط نرخ جذب ویژه بدن دارد (۳۸).

از مطالب گفته شده در این بخش، می‌توان نتیجه گرفت که مطالعه بر روی تأثیر امواج صفحه‌ای بر روی بافت‌های بدن، در محاسبه متوسط نرخ ضریب جذب ویژه، یک موضوع مهم در تحقیقات بیوالکترومغناطیسی می‌باشد.

۲- میدان نزدیک

در این بخش، به طور خلاصه، به مطالعه و مرور مقالات چاپ شده برای مطالعه تأثیر امواج الکترومغناطیسی میدان نزدیک بر بافت‌های بدن خواهیم پرداخت.

معرض میدان نزدیک منبع الکترومغناطیسی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در سال ۱۹۹۲، «گاندی» (Gandhi) محاسبات نرخ مخصوص جذب (SAR) را با استفاده از روش عددی تفاضل محدود-حوزه زمان، برای بدن انسان با ۴۵۰۰۰ سلول در بازه فرکانسی ۱۰-۹۱۵ مگاهرتز گزارش داد (۳۱). در این مقاله، بیشترین ضریب جذب ویژه در بدن، در گردن و سر انسان در فرکانس ۲۰۰ مگاهرتز اتفاق افتاد (۳۱). مشابه مقاله آقای گاندی، در سال ۲۰۰۰، آقای «میسون» (Mason) به بررسی تأثیرات فرکانس و نفوذپذیری بر ضریب جذب ویژه با استفاده از روش عددی تفاضل محدود-حوزه زمان پرداخت (۳۲). در این مقاله، نویسندگان ضریب جذب ویژه بالایی را برای نواحی پا، گردن و زانو را در بازه فرکانس ۲۰۰-۶۰۰ مگاهرتز گزارش دادند (۳۲).

گرچه واژه «تشدید» معمولاً برای توصیف این مطلب به کار می‌رود که میزان جذب ماکزیمم در فرکانس‌های مشخصی اتفاق می‌افتد، یادآوری این مطلب ضروری است که این فرکانس‌های تشدید، کمترین ضریب کیفیت ($Q \ll 10$) را در کل بازه فرکانسی دارند. در سال ۲۰۰۲، «دیمیبلو» (Dimbylow) با استفاده از روش تفاضل محدود-حوزه زمان، میزان متوسط ضریب جذب ویژه را برای بدن مردی که در معرض موج تخت قرار گرفته بود، در فرکانس‌های ۱۰ مگاهرتز تا ۳ گیگاهرتز، اندازه گرفت (۱۷). در سال ۲۰۰۴، «ساندرینی» (Sandrini)، برای زنی که در معرض میدان تخت قرار

۱-۲ تشعشعات موبایل

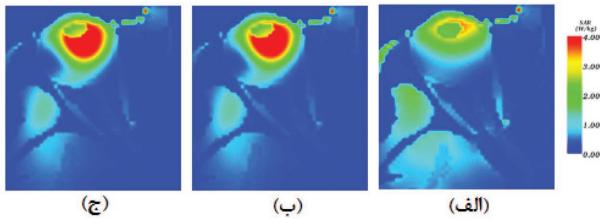
تحقیقات وسیع بر روی تشعشع موبایل و تاثیر آن بر روی سر انسان، از دهه ۱۹۹۰ شروع شده است. در سال ۱۹۹۴، «دیمیبلو» (Dimbylow) با استفاده از روش تفاضل محدود-حوزه زمان، نرخ متوسط جذب ویژه را در سر واقعی در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز اندازه‌گیری نمود (۳۹). نتایج به دست آمده نشان داد که قرار دادن سر انسان در مجاورت گوشی همراه، توزیع نرخ مخصوص جذب را تغییر می‌دهد (۳۹).

در سال ۱۹۹۸، «لازی» (Lazzi) و همکاران، مقایسه‌ای بین الگوهای تشعشعی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با روش تفاضل محدود-حوزه زمان، برای گوشی‌های همراه تجاری در نزدیکی سر انسان در هنگام مکالمه، انجام دادند (۴۰-۴۲). نتایج انجام شده توسط این گروه تحقیقاتی ثابت کرد که روش تفاضل محدود-حوزه زمان، یک روش ارزشمند برای مطالعه آنتن‌های موبایل جهت کاهش اثرات مخرب امواج آن بر روی سر انسان است (۴۰-۴۲).

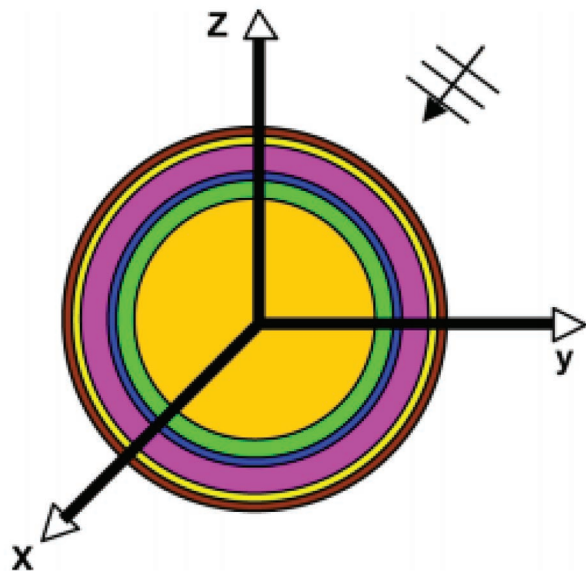
در سال ۲۰۰۲، «ون دو کامر» (van de kamer) با استفاده از روش تفاضل محدود-حوزه زمان، توزیع نرخ جذب ویژه را برای سر یک زن که در کنار یک آنتن دو قطبی با فرکانس ۹۱۵ مگاهرتز قرار گرفته بود، محاسبه کرد (۴۳). دو سال بعد، «گاندی» و «کانگ» (Kang) ادعا کردند که استفاده از فانتوم‌های همگن سر، توزیع نرخ جذب ویژه را در کودکان و بزرگسالان، کاهش می‌دهد (۴۴). «برد» (Beard) در سال ۲۰۰۶، مقاله‌ای منتشر کرد که در آن، تاثیر فاکتورهای مهم در توزیع نرخ جذب ویژه مانند نوع آنتن موبایل و جهت و موقعیت آنتن نسبت به سر بررسی و مطالعه شده بود (۴۵).

با پیدایش و گسترش نسل‌های جدید گوشی همراه، دانشمندان زیادی در سرتاسر دنیا به بررسی تاثیر تشعشعات تلفن همراه بر سر افراد خردسال پرداختند. نمونه‌ای از آن‌ها، مقاله (۴۶) است که با استفاده از روش تفاضل محدود-حوزه زمان، توزیع نرخ جذب ویژه را برای فرد بزرگسال (زن و مرد) و کودک (۳ ساله و ۷ ساله) در فرکانس‌های ۹۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۴۵۰ مگاهرتز یک آنتن دو قطبی نیم موج، محاسبه می‌کند. محاسباتی که نشان داد میزان نفوذ امواج موبایل در سر کودکان بیشتر از افراد بالغ بوده و لذا کودکان باید از گوشی همراه، کمتر استفاده کنند (۴۶).

بررسی میزان تاثیر امواج گوشی همراه بر قسمت‌های دیگر سر



شکل ۵- توزیع نرخ مخصوص جذب چشم راست در فرکانس‌های: الف) ۹۰۰، ب) ۱۵۰۰ و ج) ۱۸۰۰ مگاهرتز (۴۷)



شکل ۶- مدل ۶ لایه کروی مغز انسان (به جای مدل دقیق) که در معرض تابش یک موج صفحه‌ای قرار گرفته است (۵۴)

انسان نظیر گوش و چشم، در مقاله‌های متعددی صورت گرفته که مقاله (۴۷)، نمونه‌ای از آن‌هاست. در این تحقیق، بیک متوسط توزیع نرخ جذب ویژه چشم راست در فرکانس‌های ۹۰۰، ۱۵۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب ۴،۵، ۷،۷ و ۸،۴ وات بر کیلوگرم گزارش شده است (۴۷).

لازم به ذکر است که محاسبه توزیع نرخ جذب ویژه سر که در مجاورت تلفن همراه قرار گرفته، تنها محدود به روش عددی تفاضل محدود-حوزه زمان نبوده و روش‌های دیگری نظیر روش مومنت، روش المان محدود و روش انتگرال محدود نیز در مقالات استفاده شده است. برای نمونه، در مقالات (۴۸-۴۹)، روش المان محدود، برای مطالعه توزیع نرخ جذب ویژه سر و در مقاله (۵۰)، نویسنده با استفاده از روش مومنت، به تحلیل الکترومغناطیسی موبایل در نزدیکی سر پرداخته و الگوهای تشعشعی موبایل در حضور سر را در صفحه $\theta = 90^\circ$ رسم نموده است (۵۰). در مقالات (۵۱-۵۲)، با

میدان‌های خیلی بالا (بالای ۴ تسلا) متمرکز شده‌اند (۶۴-۶۶). برای نمونه، «وون» (Vaughan)، توان، همگنی میدان و توزیع نرخ جذب ویژه مربوط به سیم پیچی ۱۶ عنصری دوگانه را برای عکس سر انسان در فرکانس‌های ۱۷۰ و ۳۰۰ مگاهرتز با استفاده از روش تفاضل محدود-حوزه زمان، مطالعه کرد (۶۴).

برای بررسی اثرات تصویربرداری تشدید مغناطیسی بر بدن، محققین از روش‌های دیگری غیر از روش تفاضل محدود-حوزه زمان، بهره جستند (۶۷-۶۸). در مقاله (۶۷)، نویسندگان از روش ترکیبی مومنت-المان محدود، برای مدل کردن یک سیم پیچ آرایه‌ای ۴ عنصری در فرکانس ۴۷۰ مگاهرتز استفاده کرده و میدان‌های تولید شده در سیم پیچ را ماکزیمم کرده‌اند. در مقاله (۶۸)، روش مومنت، برای بررسی افزایش نرخ جذب ویژه نزدیک به سیم‌های هدایتی استفاده شده و تابع گرین پیشنهادی برای معادله انتقال بیوگرمایی برای پیش بینی تغییرات دمایی، ارائه شده است.

۲-۳ گرما درمانی (Thermal Therapy)

هیپرترمی (Hyperthermia)، یک روش درمانی برای سرطان است که هدف آن، افزایش دمای بافت مورد نظر به سطوح درمانی (بازه دمایی ۴۲-۴۵ درجه سلسیوس) و نگه داشتن بافت در این بازه دمایی است که این روش، اغلب با رادیو درمانی (Radiotherapy) یا شیمی درمانی (Chemotherapy) انجام می‌شود.

مطالعات اولیه برای درمان تومورهای پیشرفته سر و گردن با ترکیب روش هیپرترمی محلی (Local hyperthermia) و رادیو درمانی، توسط «والدانی» (Valdagni)، نتایج خوبی را نشان داد (۶۹). چهار سال بعد، «استوفر» (Stauffer) وابستگی توزیع نرخ جذب ویژه را در مدل فانتوم بر موقعیت خط تغذیه در ادوات مایکرواستریپ، در فرکانس ۹۱۵ مگاهرتز بررسی کرد (۷۰). در سال ۲۰۰۵، «پولایدز» (Paulides) با استفاده از روش تفاضل محدود-حوزه زمان، آرایه‌ای از آنتن‌های دوقطبی را برای قرار دادن حداکثر میزان انرژی در گردن، طراحی نمود (۷۱). دو سال بعد، همین محقق یک آرایه جدید بهینه در فرکانس ۴۳۳ مگاهرتز برای درمان تومورهای سر و گردن، معرفی کرد (۷۲).

در سال‌های بعد، دو نوع جدید و پرکاربرد از هیپرترمی، تحت عنوان هیپرترمی منطقه‌ای (Regional hyperthermia) و هیپرترمی بینابینی

استفاده از روش‌های تفاضل محدود-حوزه زمان و انتگرال محدود، پارامترهای گوناگون نظیر شکل، اندازه و عدم تقارنی جذب انرژی را با هدف ارزیابی فانتوم‌های همگن سر، مورد بررسی دقیق قرار گرفته است. در مقاله دیگری در سال ۲۰۱۰، فانتوم نرخ جذب ویژه برای سر خردسال با روش انتگرال محدود، مورد مطالعه قرار گرفته است (۵۳).

جنبه‌های ریاضی و تحلیلی میدان‌های نفوذی امواج موبایل بر سر، در مقالات (۵۴-۵۷) انجام شده است. برای نمونه، مقاله (۵۴) یک مدل ۶ لایه کروی را برای مغز انسان (به جای مدل دقیق مغز) در نظر گرفته و با قرار دادن مغز در نزدیکی آنتن دوقطبی نیم موج، به تحلیل ریاضی امواج جذب شده در مغز می‌پردازد. مقاله (۵۷)، رابطه توزیع نرخ جذب ویژه را با سن افراد مورد کاوش و بررسی قرار می‌دهد.

۲-۲ تصویر برداری تشدید مغناطیسی (MRI)

امروزه به دلیل کاربردهای متنوع تصویربرداری تشدید مغناطیسی (ام آر آی)، استفاده از آن به شدت افزایش یافته است. در این میان، افزایش ایمنی و کاهش اثرات مخرب تصویربرداری تشدید مغناطیسی، از چالش‌های پیش روی دانشمندان در سال‌های اخیر بوده است.

مدل کردن اثر متقابل میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از این تصویربرداری با بدن، بر مبنای مدل‌های تحلیلی ساده، ابتدا در مقالات (۵۸-۵۹) انجام شد؛ به گونه‌ای که مدل‌های سه بعدی خیلی واقعی برای مدل‌های سر انسان بررسی شدند. در سال ۱۹۶۶، «سیمونیک» (Šimunic) از روش المان محدود، برای پیش بینی و تعیین نرخ جذب ویژه و بررسی تغییرات دمایی در مدل سر واقعی در فرکانس ۶۴ مگاهرتز استفاده کرد (۶۰). در همین سال، «جین» (Jin) از روش گرادیان مزدوج ترکیبی با تبدیل فوریه سریع، برای بررسی میدان مغناطیسی و توزیع نرخ جذب ویژه در سر انسان بهره جست (۶۱). کار مشابهی توسط «کالینز» (Collins) با استفاده از روش تفاضل محدود-حوزه زمان در فرکانس‌های ۶۳، ۱۷۵ و ۲۰۰ مگاهرتز انجام گرفت (۶۲-۶۳).

در تحقیقات انجام شده بر روی تصویربرداری تشدید مغناطیسی، چندین مقاله تحقیقاتی بر روی فرآیندهای تشدید مغناطیسی در

رادیو متر (به ویژه میدان نزدیک) و اضافه کردن اثرات بیولوژیکی پیچیده بافت‌ها در مدل است. برای مثال، در مقاله (۷۸)، روش معادله انتگرالی برای تعیین میزان انتقال و بازتاب موجبر انتها-باز در تماس با محیط دی الکتریک با تلف، استفاده کرد.

استفاده از رادیو درمانی مایکروویو برای تشخیص سرطان سینه، یک هدف اولیه در این حوزه کاری بوده است (۷۹-۸۰). برای نمونه، در مقاله (۸۰)، نویسندگان با استفاده از روش تفاضل محدود-حوزه زمان، برای اندازه‌گیری رادیومتری سینه تحت آزمایش، سرطان سینه را بررسی کرده‌اند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری، ابتدا معادلات ماکسول و انواع روش‌های عددی و تحلیلی استفاده شده در مقالات برای مطالعه تاثیر امواج الکترومغناطیس بر بدن انسان به طور مختصر معرفی شد. سپس انواع نرم افزارهای تجاری و تحقیقاتی موجود برای شبیه سازی معرفی شدند. سپس، مدل‌های بدن انسان در حضور امواج الکترومغناطیسی مطالعه شدند که مهم‌ترین آن‌ها، روابط دی‌بای و کُل-کُل بود. در این مدل‌ها، ویژگی الکتریکی بافت‌ها بر اساس ضرایب نفوذپذیری الکتریکی و هدایت پذیری بافت‌ها بیان می‌شود. در آخر، بر اساس میزان دوری یا نزدیک منبع تشعشع کننده امواج به بافت موردنظر، اثرات امواج را بر بدن طبقه بندی کرده و هر یک به تفصیل مطالعه شد.

(Interstitial hyperthermia) معرفی و مطالعه شدند (۷۳-۷۶). برای نمونه در مقاله (۷۳)، نرم افزار طرح درمانی برای تحلیل درمان ۳۰ بیمار استفاده شد و نتایج بدست آمده، نشان داد که همبستگی خوبی بین داده‌های شبیه سازی شده و داده‌های کلینیکی وجود دارد. هر دو روش عددی تفاضل محدود-حوزه زمان و المان محدود در این مقاله، حدود ۱۰ درصد با مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف داشتند (۷۳).

۴-۲ رادیو متری مایکروویو (Microwaveradiometry)

رادیو متری مایکروویو، اندازه‌گیری توان مایکروویو ناشی از تشعشع گرمایی از بافت‌های بدن است که با اندازه‌گیری دمای شفاف (brightness temperature) به دست می‌آید (۷۷):

$$T_B = \frac{P}{k \Delta f} \quad (8)$$

که در رابطه فوق، k ثابت بولتزمن و P ، توان گرمایی تشعشعی دریافت شده توسط آنتن در پهنای باند Δf در فرکانس مرکزی f_0 است.

در سال ۱۹۹۵، تیلور با استفاده از روش عددی تفاضل محدود-حوزه زمان، رابطه بین توان دریافتی توسط آنتن و منابع تشعشعی گرمایی مایکروویو را کشف کرد (۷۷). مزیت استفاده از روش عددی، برای مطالعه رادیو درمانی، توانایی مدل سازی دقیق مشخصات

References

- Harrington RF. Time-harmonic electromagnetic fields. New York: Wiley-IEEE Press; 1961.
- Jin J. Electromagnetic analysis and design in magnetic resonance imaging. New York: CRC press; 1998.
- Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. IEEE Transactions on antennas and propagation. 1966 May;14(3):302-7.
- Taflove A, Brodwin ME. Computation of the electromagnetic fields and induced temperatures within a model of the microwave-irradiated human eye. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1975 Nov;23(11):888-96.
- Jin JM. Theory and computation of electromagnetic fields. New York; John Wiley & Sons; 2011.
- Weiland T. A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik. 1977 Mar;31:116-20.
- Harrington RF. Matrix methods for field problems. Proceedings of the IEEE. 1967 Feb;55(2):136-49.
- Mangoud MA, Abd-Alhameed RA, Excell PS. Simulation of human interaction with mobile telephones using hybrid techniques over coupled domains. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2000 Nov 1;48(11):2014-21.
- Abd-Alhameed RA, Excell PS, Mangoud MA. Computation of specific absorption rate in the human body due to base-station antennas using a hybrid formulation. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005 May;47(2):374-81.
- Jafari N, Heydari MB, Asgari M. Simulation of Mobile Radiations in Vicinity of Adult and Child Head. Paramedical

- Sciences and Military Health. 2018 Jun 15;13(1):1-7.
- 11- Jakobus U. Parallel computation of the electromagnetic field of hand-held mobile telephones radiating close to the human head. *Advances in Parallel Computing*. 1998;12:163-170.
 - 12- Nikita KS, Stamatakos GS, Uzunoglu NK, Karafotias A. Analysis of the interaction between a layered spherical human head model and a finite-length dipole. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2000 Nov;48(11):2003-13.
 - 13- Reyhani SM, Ludwig SA. An implanted spherical head model exposed to electromagnetic fields at a mobile communication frequency. *IEEE transactions on biomedical engineering*. 2006 Oct;53(10):2092-101.
 - 14- Razansky D, Soldea DF, Einziger PD. Generalized transmission-line model for estimation of cellular handset power absorption in biological tissues. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*. 2005 Feb;47(1):61-7.
 - 15- Sullivan DM, Borup DT, Gandhi OP. Use of the finite-difference time-domain method in calculating EM absorption in human tissues. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1987;2:148-57.
 - 16- Gandhi OP, Lazzi G, Furse CM. Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*. 1996 Oct;44(10):1884-97.
 - 17- Dimbylow PJ. Fine resolution calculations of SAR in the human body for frequencies up to 3 GHz. *Physics in Medicine & Biology*. 2002 Jul 24;47(16):2835.
 - 18- Gjonaj E, Bartsch M, Clemens M, Schupp S, Weiland T. High-resolution human anatomy models for advanced electromagnetic field computations. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002 Mar;38(2):357-60.
 - 19- Mazzurana M, Sandrini L, Vaccari A, Malacarne C, Cristoforetti L, Pontalti R. A semi-automatic method for developing an anthropomorphic numerical model of dielectric anatomy by MRI. *Physics in Medicine & Biology*. 2003 Sep 16;48(19):3157.
 - 20- Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, Watanabe S, Taki M, Yamanaka Y. Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. *Physics in Medicine & Biology*. 2003 Dec 15;49(1):1.
 - 21- Liu W, Collins CM, Smith MB. Calculations of B₁ distribution, specific energy absorption rate, and intrinsic signal-to-noise ratio for a body-size birdcage coil loaded with different human subjects at 64 and 128 MHz. *Applied magnetic resonance*. 2005 Mar 1;29(1):5.
 - 22- Gabriel C, Gabriel S, Corthout YE. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Physics in Medicine & Biology*. 1996 Nov;41(11):2231.
 - 23- Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. *Physics in medicine & biology*. 1996 Nov;41(11):2251.
 - 24- Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Physics in Medicine & Biology*. 1996 Nov;41(11):2271.
 - 25- Smith SR, Foster KR. Dielectric properties of low-water-content tissues. *Physics in Medicine & Biology*. 1985 Sep;30(9):965.
 - 26- Lazebnik M, Popovic D, McCartney L, Watkins CB, Lindstrom MJ, Harter J, Sewall S, Ogilvie T, Magliocco A, Breslin TM, Temple W. A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant breast tissues obtained from cancer surgeries. *Physics in Medicine & Biology*. 2007 Oct 1;52(20):6093.
 - 27- Lazebnik M, Okoniewski M, Booske JH, Hagness SC. Highly accurate Debye models for normal and malignant breast tissue dielectric properties at microwave frequencies. *IEEE microwave and wireless components letters*. 2007 Dec;17(12):822-4.
 - 28- Simicevic N. Three-dimensional FDTD simulation of biomaterial exposure to electromagnetic nanopulses. *Physics in Medicine & Biology*. 2005 Oct 13;50(21):5041.
 - 29- Ireland D, Abbosh A. Optimised second-order Debye parameters for head tissues at microwave frequencies. In. *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Chicago, USA; 2012. P. 1-2.
 - 30- Ireland D, Abbosh A. Modeling human head at microwave frequencies using optimized Debye models and FDTD method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013 Apr;61(4):2352-5.
 - 31- Ireland D, Abbosh A. Modeling human head at microwave frequencies using optimized Debye models and FDTD method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013 Apr;61(4):2352-5.
 - 32- Gandhi OP, Gu YG, Chen JY, Bassen HI. Specific absorption rates and induced current distributions in an anatomically based human model for plane-wave exposures. *Health Physics*. 1992 Sep;63(3):281-90.
 - 33- Mason PA, Hurt WD, Walters TJ, D'Andrea JA, Gajsek P, Ryan KL, Nelson DA, Smith KI, Ziriak JM. Effects of frequency, permittivity, and voxel size on predicted specific absorption rate values in biological tissue during electromagnetic-field exposure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2000 Nov;48(11):2050-8.
 - 34- Sandrini L, Vaccari A, Malacarne C, Cristoforetti L, Pontalti R. RF dosimetry: a comparison between power absorption of female and male numerical models from 0.1 to 4 GHz. *Physics in Medicine & Biology*. 2004 Oct 29;49(22):5185.



- 35- Dimbylow P. Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. *Physics in Medicine & Biology*. 2005 Feb 23;50(6):1047.
- 36- Dimbylow P. Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematical models and their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50 Hz. *Physics in Medicine & Biology*. 2006 Apr 27;51(10):2383.
- 37- Dimbylow P. SAR in the mother and foetus for RF plane wave irradiation. *Physics in medicine & biology*. 2007 May 29;52(13):3791.
- 38- Nagaoka T, Togashi T, Saito K, Takahashi M, Ito K, Watanabe S. An anatomically realistic whole-body pregnant-woman model and specific absorption rates for pregnant-woman exposure to electromagnetic plane waves from 10 MHz to 2 GHz. *Physics in Medicine & Biology*. 2007 Oct 30;52(22):6731.
- 39- Hirata A, Kodera S, Wang J, Fujiwara O. Dominant factors influencing whole-body average SAR due to far-field exposure in whole-body resonance frequency and GHz regions. *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*. 2007 Sep;28(6):484-7.
- 40- Dimbylow PJ, Mann SM. SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. *Physics in Medicine & Biology*. 1994 Oct;39(10):1537.
- 41- Lazzi G, Pattnaik SS, Furse CM, Gandhi OP. Comparison of FDTD computed and measured radiation patterns of commercial mobile telephones in presence of the human head. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1998 Jun;46(6):943-4.
- 42- Lazzi G, Gandhi OP. On modeling and personal dosimetry of cellular telephone helical antennas with the FDTD code. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1998 Apr;46(4):525-30.
- 43- Lazzi G, Pattnaik SS, Gandhi OP. Experimental and FDTD-computed radiation patterns of cellular telephones held in slanted operational conditions. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*. 1999 May;41(2):141-4.
- 44- Van de Kamer JB, Lagendijk JJ. Computation of high-resolution SAR distributions in a head due to a radiating dipole antenna representing a hand-held mobile phone. *Physics in Medicine & Biology*. 2002 May 2;47(10):1827.
- 45- Gandhi OP, Kang G. Some present problems and a proposed experimental phantom for SAR compliance testing of cellular telephones at 835 and 1900 MHz. *Physics in Medicine & Biology*. 2002 Apr 19;47(9):1501.
- 46- Beard BB, Kainz W, Onishi T, Iyama T, Watanabe S, Fujiwara O, Wang J, Bit-Babik G, Faraone A, Wiart J, Christ A. Comparisons of computed mobile phone induced SAR in the SAM phantom to that in anatomically correct models of the human head. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2006 May;48(2):397-407.
- 47- Keshvari J, Lang S. Comparison of radio frequency energy absorption in ear and eye region of children and adults at 900, 1800 and 2450 MHz. *Physics in Medicine & Biology*. 2005 Sep 7;50(18):4355.
- 48- Flyckt VM, Raaymakers BW, Kroeze H, Lagendijk JJ. Calculation of SAR and temperature rise in a high-resolution vascularized model of the human eye and orbit when exposed to a dipole antenna at 900, 1500 and 1800 MHz. *Physics in Medicine & Biology*. 2007 Apr 25;52(10):2691.
- 49- Seker SS, Demirbilek BO, Morgul A. SAR assessment in a human head model exposed to radiation from mobile phone using FEM. In *Electromagnetic Compatibility, 2002. EMC 2002. IEEE International Symposium on 2002 Aug 19 (Vol. 2, pp. 662-666)*. IEEE.
- 50- Kleiven S. Finite element modeling of the human head (Doctoral dissertation, KTH).
- 51- Ruoss HO, Jakobus U, Landstorfer FM. Efficient EM analysis of hand-held mobile telephones close to human head using modified method of moments. *Electronics Letters*. 1995 Jun 8;31(12):947-8.
- 52- Hombach V, Meier K, Burkhardt M, Kuhn E, Kuster N. The dependence of EM energy absorption upon human head modeling at 900 MHz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1996 Oct;44(10):1865-73.
- 53- Cooper J, Marx B, Buhl J, Hombach V. Determination of safety distance limits for a human near a cellular base station antenna, adopting the IEEE standard or ICNIRP guidelines. *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*. 2002 Sep;23(6):429-43.
- 54- Monebhurrn V. Conservativeness of the SAM phantom for the SAR evaluation in the child's head. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010 Aug;46(8):3477-80.
- 55- Khodabakhshi H, Cheldavi A. Irradiation of a six-layered spherical model of human head in the near field of a half-wave dipole antenna. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010 Mar;58(3):680-90.
- 56- Kang XK, Li LW, Leong MS, Kooi PS. Specific absorption rate distributions in a multilayered spheroidal human head model exposed to mobile dipoles. *Radio Science*. 2000 Jan;35(1):247-56.
- 57- Moneda AP, Ioannidou MP, Chrissoulidis DP. Radio-wave exposure of the human head: Analytical study based on a versatile eccentric spheres model including a brain core and a pair of eyeballs. *IEEE transactions on biomedical engineering*. 2003 Jun;50(6):667-76.
- 58- Fernández-Rodríguez CE, De Salles AA, Davis DL.

- Dosimetric simulations of brain absorption of mobile phone radiation—the relationship between psSAR and age. *IEEE Access*. 2015;3:2425-30.
- 59- Bottomley PA, Andrew ER. RF magnetic field penetration, phase shift and power dissipation in biological tissue: implications for NMR imaging. *Physics in Medicine & Biology*. 1978 Jul;23(4):630.
- 60- Foo TK, Hayes CE, Kang YW. An analytical model for the design of RF resonators for MR body imaging. *Magnetic resonance in medicine*. 1991 Oct;21(2):165-77.
- 61- Simunic D, Wach P, Renhart W, Stollberger R. Spatial distribution of high-frequency electromagnetic energy in human head during MRI: numerical results and measurements. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1996 Jan;43(1):88.
- 62- Jin JM, Chen J, Chew WC, Gan H, Magin RL, Dimbylow PJ. Computation of electromagnetic fields for high-frequency magnetic resonance imaging applications. *Physics in Medicine & Biology*. 1996 Dec;41(12):2719.
- 63- Collins CM, Li S, Smith MB. SAR and B1 field distributions in a heterogeneous human head model within a birdcage coil. *Magnetic Resonance in Medicine*. 1998 Dec;40(6):847-56.
- 64- Collins CM, Liu W, Wang J, Gruetter R, Vaughan JT, Ugurbil K, Smith MB. Temperature and SAR calculations for a human head within volume and surface coils at 64 and 300 MHz. *Journal of Magnetic Resonance Imaging: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*. 2004 May;19(5):650-6.
- 65- Vaughan JT, Garwood M, Collins CM, Liu W, DelaBarre L, Adriany G, Andersen P, Merkle H, Goebel R, Smith MB, Ugurbil K. 7T vs. 4T: RF power, homogeneity, and signal-to-noise comparison in head images. *Magnetic resonance in medicine*. 2001 Jul 1;46(1):24-30.
- 66- Wang J, Yang QX, Zhang X, Collins CM, Smith MB, Zhu XH, Adriany G, Ugurbil K, Chen W. Polarization of the RF field in a human head at high field: a study with a quadrature surface coil at 7.0 T. *Magnetic resonance in medicine*. 2002 Aug 1;48(2):362-9.
- 67- Wang C, Shen GX. B1 field, SAR, and SNR comparisons for birdcage, TEM, and microstrip coils at 7T. *Journal of Magnetic Resonance Imaging: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*. 2006 Aug;24(2):439-43.
- 68- Li BK, Liu F, Crozier S. High-field magnetic resonance imaging with reduced field/tissue RF artefacts—A modeling study using hybrid MoM/FEM and FDTD technique. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*. 2006 Nov;48(4):628-33.
- 69- Yeung CJ, Susil RC, Atalar E. RF safety of wires in interventional MRI: using a safety index. *Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*. 2002 Jan;47(1):187-93.
- 70- Valdagni R, Amichetti M. Report of long-term follow-up in a randomized trial comparing radiation therapy and radiation therapy plus hyperthermia to metastatic lymphnodes in stage IV head and neck patients. *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics*. 1994 Jan 1;28(1):163-9.
- 71- Stauffer PR, Rossetto F, Leencini M, Gentili GB. Radiation patterns of dual concentric conductor microstrip antennas for superficial hyperthermia. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1998 May;45(5):605-13.
- 72- Paulides MM, Vossen SH, Zwamborn AP, van Rhooen GC. Theoretical investigation into the feasibility to deposit RF energy centrally in the head-and-neck region. *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics*. 2005 Oct 1;63(2):634-42.
- 73- Stauffer PR, Rossetto F, Leencini M, Gentili GB. Radiation patterns of dual concentric conductor microstrip antennas for superficial hyperthermia. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1998 May;45(5):605-13.
- 74- Paulides MM, Vossen SH, Zwamborn AP, van Rhooen GC. Theoretical investigation into the feasibility to deposit RF energy centrally in the head-and-neck region. *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics*. 2005 Oct 1;63(2):634-42.
- 75- Paulides MM, Bakker JF, Zwamborn AP, Van Rhooen GC. A head and neck hyperthermia applicator: Theoretical antenna array design. *International journal of hyperthermia*. 2007 Jan 1;23(1):59-67.
- 76- Sreenivasa G, Gellermann J, Rau B, Nadobny J, Schlag P, Deuflhard P, Felix R, Wust P. Clinical use of the hyperthermia treatment planning system HyperPlan to predict effectiveness and toxicity. *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics*. 2003 Feb 1;55(2):407-19.
- 77- Gellermann J, Göke J, Figiel R, Weihrauch M, Cho CH, Budach V, Felix R, Wust P. Simulation of different applicator positions for treatment of a presacral tumour. *International journal of hyperthermia*. 2007 Jan 1;23(1):37-47.
- 78- Hamada L, Saito K, Yoshimura H, Ito K. Dielectric-loaded coaxial-slot antenna for interstitial microwave hyperthermia: longitudinal control of heating patterns. *International journal of hyperthermia*. 2000 Jan 1;16(3):219-29.
- 79- Camart JC, Despretz D, Prevost B, Sozanski JP, Chive M, Pribetich J. New 434MHz interstitial hyperthermia system monitored by microwave radiometry: theoretical and experimental results. *International journal of hyperthermia*. 2000 Jan 1;16(2):95-111.
- 80- Taylor HC, Hand JW, Lau RW. FDTD modelling for microwave dosimetry and thermography.
- 81- Teodoridis V, Sphicopoulos T, Gardiol FE. The reflection from an open-ended rectangular waveguide terminated by a layered dielectric medium. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*. 1985 May;33(5):359-66.

82- El-Shenawee M. Numerical assessment of multifrequency microwave radiometry for sensing malignant breast cancer tumors. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2003 Mar 5;36(5):394-8.

83- Bardati F, Iudicello S, Tognolatti P. A Microwave radiometer for diagnosis of breast malignancy. In *Electromagnetics in Advanced Applications*, 2007. ICEAA 2007. International Conference on 2007 Sep 17 (pp. 1014-1017). IEEE.